بررسی عامل‌های اثر گذار بر کارکرد روش شیار زنی برای در اختیار گرفتن جدا شدگی ورق FRP از سطح بتن*

داود مستوفی نژاد [۱]   محمد جواد حاج رسولیها [۲]

چکیده *آماده نبودن سطح بتن برای پیوند مناسب بین سطح بتن و ورق مرکب FRP از جمله دلیل‌های مهم جدا شدگی این ورق‌ها از سطح بتن به شمار می‌رود. این مسأله به شکست زودرس و غیر اقتصادی عضو سازه‌ای می‌انجامد. بنابراین امروزه پیش از چسباندن ورق FRP به سطح بتن برای مقاوم سازی، آماده سازی سطحی انجام می‌شود. ولی آماده سازی سطحی بتن با دشواری‌هایی مانند هزینه‌ی کار و آلودگی زیست محیطی روبروست؛ در همین راستا از مدتی پیش پژوهشگران دانشگاه صنعتی اصفهان، روش شیار زنی را به عنوان جایگزینی مناسب برای آمادسازی سطحی پیشنهاد دادند. در این مقاله میزان اثرگذاری عامل‌های عمق و عرض شیار بر کارآیی روش نوین شیار زنی برای در اختیارگرفتن جدا شدگی ورق FRP بررسی می‌شود. نمونه‌های موجود در آزمایشگاه ۳۳ نمونه منشوری غیرمسلح با ابعاد ۵۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر می‌باشند. نخست، بر روی سطح همه نمونه‌ها ۲ شیار با طول، عرض و عمق مشخص ایجاد و سپس داخل شیارها به طور کامل با اپوکسی مناسب پر شد. همه نمونه‌ها با ورقه‌های CFRP مسلح و با آزمایش خمش ٤ نقطه‌ای آزموده شدند. نتیجه‌های این پژوهش نشان داد که اثر افزایش عرض شیارها بیش از افزایش عمق می‌باشد. همچنین می‌توان با انتخاب عمق و عرض شیار معین، از جداشدگی سطحی ورق به طور کامل پیشگیری کرد و یا تا اندازه زیادی سبب دیرکرد در پدید آمدن جداشدگی شد.*

واژه‌های کلیدی ورق کامپوزیتی FRP، آماده سازی سطحی، جداشدگی سطحی، روش شیار زنی.

Investigation of Effective Factors on the Performance of Grooving Method to Prevent Debonding of FRP Sheets from Concrete Surface

D. Mostofinejad   M. J. Hajrasouliha

Abstract *A major challenges in flexural strengthening of reinforced concrete beams by FRP laminates is FRP sheet debonding from the concrete substrate, which leads to the premature failure of strengthened structural member. Surface preparation of concrete before FRP sheets installation is a suitable method to postpone debonding, however the effectiveness of the method is limited by the problems such as practical costs and environmental pollution. Grooving is an innovative technique to overcome debonding of FRP laminates from concrete surface, which has been recently used in Isfahan University of Technology (IUT). In this paper, the effect of some factors influencing the grooving capability aiming at reducing the debonding potential of FRP sheets from the concrete surface is addressed. These factors include the width and the depth of the grooves. In the experimental study, thirty-three prism specimens of dimensions 100×100×500 mm were subjected to 4-point flexural loading. The surfaces of the specimens have been grooved. After reinforcing the specimens by CFRP sheets, the four point flexural tests were carried out to measure the ultimate loading capacity. The results indicate that debonding can be completely prevented or highly limited by applying specified width and depth for the grooves.*

Key Words Fiber Reinforced Polymer (FRP), Debonding, Surface preparation, Grooving, Strengthening.

---

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۹/۸/۱۵ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۸۹/۹/۲۹ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

(۲) کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

مقدمه

مقاوم‌سازی سازه‌های قدیمی و نیز نداشتن توانایی باربری برخی از سازه‌های موجود (بنا به دلیل‌هایی مانند گردآوری آیین‌نامه‌های نوین زلزله، افزایش بارهای وارده ناشی از تغییر کاربری و ...)، سبب شده است که بازسازی و مقاوم‌سازی سازه‌ها به عنوان یکی از بحث‌های مهم در بین پژوهشگران مطرح شود. یکی از مصالحی که در سال‌های اخیر برای بهسازی و تقویت سازه‌های گوناگون کاربرد فراوانی پیدا کرده است، مواد مرکب FRP (پلاستیک‌های مسلح شده به الیاف) می‌باشند. این گونه از ماده‌های مرکب از برتری‌های گوناگونی مانند مقاومت بالا، وزن کم، آسانی نصب، مقاومت در برابر خوردگی و تغییرات ناچیز در هندسه برخوردارند و به همین دلیل این گونه الیاف در تقویت و بازسازی انواع سازه‌ها بسیار به کار می‌رود [1].

در معمول، مقاومت خمشی تیرهای بتن آرمه با تکیه‌گاه‌های ساده با چسباندن ورق FRP به وجه کششی تیر بهبود می‌یابد. این گونه مقاوم سازی می‌تواند به شکل ساده یا با پیش کشیده‌کردن ورق FRP پیش از چسباندن آن به سطح تیر و یا با فراهم آوردن مهار لازم، مانند نوارهای U شکل در انتهای ورق، برای کاهش احتمال گسیختگی ناشی از جداشدگی ورق از سطح تیر انجام شود.

پژوهش‌های آزمایشگاهی در سال‌های اخیر نشان داده است که حالت‌های گسیختگی برای تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت شده با ورق ساده FRP بسیار است؛ ولی می‌توان گسیختگی را به سه دسته‌ی گسیختگی خمشی، برشی و جداشدگی به صورت کلی دسته بندی کرد. هر یک از این دسته‌ها خود به چندین حالت تقسیم می‌شوند که عبارتند از: گسیختگی خمشی با پارگی FRP (Flexural Failure by FRP Rupture)، گسیختگی خمشی با خرد شدگی بتن (Flexural Failure by Crushing of Compressive Concrete) ، گسیختگی برشی (Shear Failure) ، جدا شدگی پوشش بتن (Concrete Cover Seperation)، جدا شدگی بین سطحی ورق انتهایی (Plate- end Interfacial Debonding)، جدا شدگی بین سطحی ناشی از ترک میانی خمشی (Intermediate Flexural Crack-induced Interfacial Debonding) و جدا شدگی بین سطحی ناشی از ترک برشی- خمشی (Intermediate Flexural Crack-induced Interfacial Debonding) [2].

اگر انتهای ورق تقویتی به صورت مناسب مهار شود، می‌توان به ظرفیت نهایی خمشی تیر با پارگی ورق FRP و یا خرد شدگی بتن در ناحیه‌ی فشاری دست یافت [3]. همچنین تیرهای بتن آرمه در حالت گسیختگی برشی می‌توانند به صورت ترد گسیخته شوند [3]. در تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت شده با ورقه‌های FRP، به دلیل جدا شدگی ناگهانی ورق، ممکن است گسیختگی های زودرس، پیش از آن‌که تیر به ظرفیت نهایی خود برسد، روی دهد [3]. از جمله مهم‌ترین گونه جدا شدگی‌های ناگهانی ورق، جدا شدن ورق FRP به همراه پوشش روی آرماتور می‌باشد. این حالت گسیختگی از یک انتها یا در نزدیکی یک انتهای ورق شروع و به سوی بخش میانی تیر پیشروی می‌کند [3]. گونه دیگر جداشدگی ناگهانی ورق، جداشدگی بین چسب و تیر که از انتهای ورق شروع می‌شود، می‌باشد. در این گسیختگی، لایه‌ی نازکی از بتن به سطح ورق متصل است [3]. جداشدگی ممکن است در یک ترک خمشی یا در یک ترک ترکیبی خمشی- برشی در ناحیه‌ی دور از انتهای ورق آغاز و سپس به سوی یکی از دو انتهای ورق گسترده شود [3]. در این حالت نیز مقداری از بتن به سطح ورق چسبیده است. مهم‌ترین دلیل این گونه گسیختگی‌های زودرس، آماده نکردن سطح بتن پیش از چسباندن ورق مرکب FRP می‌باشد [4]. در همین راستا می‌بایست پیش از چسباندن ورق مرکب FRP به سطح

بتن، کارهایی که برای آماده سازی مورد نیاز هستند، گام به گام انجام پذیرد. با این کارها، لایه‌های سطحی ضعیف و آلودگی‌های سطح بتن از بین می‌رود و سطحی جدید با ساختاری مناسب برای چسباندن ورق FRP ایجاد می‌شود. در این روش با کمک از دستگاه ویژه‌ای، لایه‌ی ضعیف به اندازه‌ای ساییده می‌شود تا به سطح نمایان سنگدانه‌ها برسد. این کار چسبندگی مناسب و کافی بین سطح بتن و ورق مرکب FRP را فراهم می‌سازد. سپس با فشار هوا یا فشار آب، ماده‌های زیادی و ذره‌های گرد و غبار از سطح بتن برداشته می‌شوند و پس از خشک شدن کامل نمونه، ورق FRP به سطح بتن چسبانده می‌شود. اجرا نکردن درست آماده‌سازی سطحی می‌تواند منجر به پدیدآمدن ترک‌های ریزی در سطح بتن شود. این ترک‌ها سبب شکل‌گیری سطحی ضعیف و در نتیجه، کاهش مقاومت پیوستگی می‌شوند [5].

در سال‌های اخیر پژوهش‌های بسیاری در زمینه‌ی عامل‌های رویداد پدیده‌ی جداشدگی و ایجاد دیرکرد در آن با کمک روش‌های گوناگون مانند آماده‌سازی سطحی بتن انجام شده است. با این همه، این موضوع هنوز از اصلی‌ترین موضوع‌ها در زمینه FRP می باشد که نظر پژوهشگران بسیاری را به خود جلب کرده است.

در سال ۱۹۹۶، چاجس و همکاران [6]، پژوهش‌هایی را برای پی‌بردن به سرشت پیوستگی بین ورق مرکب و سطح بتن انجام دادند. آنها اثر عامل‌های گوناگونی مانند آماده‌سازی سطح بتن، نوع چسب و مقاومت بتن را بر روی مقاومت چسبندگی بررسی کردند. نتیجه‌ها نشان داد که آماده سازی سطح بتن می‌تواند مقاومت نهایی چسبندگی را ۳٪ الی ۱۰٪ افزایش دهد.

در سال ۱۹۹۸، اسپاداً و همکاران [7]، یک تیر مبنا و سه تیر به ابعاد ۱۴۰×۳۰۰×۵۰۰۰ میلی‌متر را که به صورت خارجی با ورق CFRP در ناحیه‌ی کششی تقویت شده بودند، زیر اثر بار چهار نقطه‌ای خمشی قرار دادند. آن‌ها تیرهای تقویت شده را با کاربرد از روش در اختیار گرفتن تغییر مکان و اندازه‌گیری کرنش‌ها، تغییر مکان و خمیدگی نهایی، آزمودند. پژوهش‌های آنان نشان داد که بدون کاربرد مهار خارجی، امکان دست‌یابی به ظرفیت کامل FRP وجود ندارد. از نتیجه‌های دیگر پژوهش این بود که با مهار کردن ورق افزون بر استفاده از ۹۸/۶٪ ظرفیت نهایی آن، افزایش در ظرفیت باربری را تا مقدار ۷۰٪ نسبت به تیر مبنا، ممکن می‌سازد. همچنین به کار بردن مهار خارجی در ورق‌های تقویت، حدود ۲۵ تا ۴۵٪ شکل پذیری را نسبت به تیر مبنا افزایش می‌دهد.

در سال ۲۰۰۰، کامادا و ویکتورسی [8]، آزمایش‌هایی را انجام دادند که نشان می‌داد، نمونه‌هایی که دارای سطح صاف می‌باشند، الگوی ترک و عمق ترک بهتری نسبت به نمونه‌های دارای سطح زبر برخوردارند.

در سال ۲۰۰۱، گالکی و همکاران [9]، معیار سختی و ناصافی سطح بتن را در مقاومت پیوستگی مورد بررسی قرار دادند. همچنین، کاربرد سامانه پاشش آب را برای زبر کردن سطح نمونه ها آزمودند. نتیجه‌ها بیانگر این بود که سامانه پاشش آب با فشار بالا به عنوان روش آماده سازی سطحی، مقاومت پیوستگی نمونه‌ها را نسبت به نمونه‌های بدون آماده‌سازی سطح، در حدود ۱۰ درصد افزایش می دهد.

توتانجی و اورتیز [10] در سال ۲۰۰۱، نمونه‌هایی ساختند که در آنها چندگونه ورقه‌های FRP به کار رفت و آماده‌سازی سطح به روش‌های مختلف از جمله کاربرد سامانه پاشش آب (Waterjet) و ماسه پاشی (sanding) صورت پذیرفت. در این آزمایش‌ها اثر چگونگی سطح بتن در پیوند با ورق FRP نیز بررسی شد. بنا به نتیجه این آزمایش‌ها، نمونه‌هایی که سطح آنها با سامانه پاشش آب زبر شده بود، نسبت به نمونه‌های زبر شده با ماسه‌ی معمولی، دارای مقاومت پیوستگی بیشتری بودند.

در سال ۲۰۰۲، بنکاردینو و همکاران [11]، دو مجموعه از تیرهای بتن آرمه را با کمک ورقه‌های الیاف کربن دو جهته به صورت خمشی و برشی تقویت کردند. نتیجه‌ها نشان می‌داد که چسبندگی ورقه‌های FRP به وجه کششی تیرها در تقویت خمشی، به تنهایی و بدون مهار کردن مناسب، نمی‌تواند از جدا شدگی نابهنگام ورق از سطح بتن پیشگیری کند. در این پژوهش، وجود سامانه مهار مناسب برای چیره شدن بر لغزش مهاری و جدا شدن ورق در انتها، در اختیار گرفتن لغزش ورق در طول دهانه در مقطع‌های بحرانی ترک‌خورده و افزایش همکاری ناحیه‌ی فشاری به مقاومت و انعطاف‌پذیری با دورگیر کردن این ناحیه از بتن، بسیار سفارش شده است.

بویوکوزترک و همکاران [12] در سال ۲۰۰۲، تیرهای تقویت شده با FRP را از نظر سازوکار خرابی جداشدگی ورق FRP ارزیابی کردند. نتیجه‌ها نشان داد که با افزودن نوارهای L شکل FRP به تیر تقویت شده، امکان افزایش ظرفیت برشی آن وجود دارد. این افزایش از جداشدگی موضعی در ناحیه‌ی ترک‌های خمشی- برشی پیشگیری می‌کند و رفتار تیر تقویت شده را بهبود می‌بخشد.

در سال ۲۰۰٤، پیمانماس و ساروج [13]، اثرهای شرایط گوناگون قیدهای انتهایی تیرهای بتن آرمه‌ی مسلح با ورقه‌های FRP کربنی را مورد بررسی قرار دادند. در این آزمایش‌ها، تیرها با ٤ ورق FRP با شکل‌های U، L و X دورپیچ شدند. نتیجه‌ها بیانگر این بود که کاربرد دورپیچ قائم در انتهای ورق تقویتی وجه کششی تیر، از جدا شدن انتهای ورق جلوگیری می‌کند؛ ولی باعث جدا شدگی خمشی- برشی در طول تیر خواهد شد. از سوی دیگر، نتیجه‌های مهار L یا X شکل نشان داد که می‌تواند هم از جداشدگی انتهایی و هم از جدا شدگی خمشی- برشی پیشگیری کند.

در سال ۲۰۰۸، روزنبوم و ریزکالا [14]، پژوهش‌های آزمایشگاهی خود را با هدف بررسی چگونگی جدا شدگی ورق FRP از سطح تیرهای تقویت شده با CFRP ناشی از ترک میانی انجام دادند. آن‌ها ٦ نمونه‌ی بتن آرمه‌ی پیش‌کشیده به طول ۹/۱٤ متر را با ماده مرکب CFRP تقویت و زیر بار گذاری خمشی قرار دادند. در این آزمایش ۱ تیر با دچار شدن به پارگی کامل ورق و ٤ تیر به علت جداشدگی ورق از سطح بتن ناشی از پدیدآمدن ترک میانی گسیخته شدند. ۱ نمونه‌ی باقی مانده بدون تقویت برای بررسی بار شکست تیر بتنی آزموده شد. نتیجه‌ها نشان دادند که در عضوهای بتنی خمشی پیش کشیده با دهانه‌ی بلند که با CFRP تقویت شده‌اند، نوع معمول شکست، شکست ناشی از ترک میانی (IC) بوده است. همچنین کاربرد نوارهای U شکل پس از انجام آماده سازی سطحی، برای پیشگیری از شکست زودرس، ۲۰ درصد مقاومت گسیختگی نهایی را افزایش داده‌است.

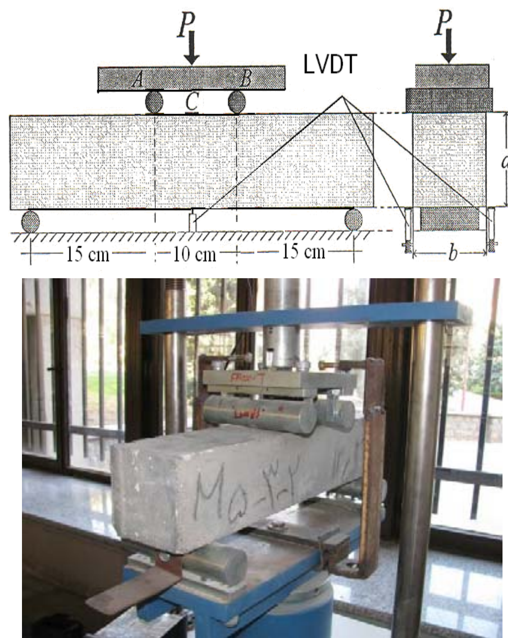
در برخی موردها محدودیت‌های کاری برای آماده‌سازی سطحی بتن وجود دارد. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به محدودیت زیست محیطی اشاره کرد که مانع از خراب کردن سطح بتن و دیگر کارهای مورد نیاز برای آماده سازی سطحی می‌شود. همچنین پژوهشگران در هیچ یک از کارهای پژوهشی به بررسی و پیشنهاد شیوه‌ی جایگزین آماده سازی سطحی که بتواند دشواری‌هایی را که برای آماده سازی سطحی وجود دارند، از میان بردارد نپرداخته‌اند.

در همین راستا، در سال ۲۰۰۸، مستوفی نژاد و محمود آبادی [16-15]، پژوهش‌هایی را در دانشگاه صنعتی اصفهان آغاز کردند که نتیجه آن منجر به نوآوری روش نوین شیار زنی به عنوان روشی مناسب برای جایگزینی روش آماده سازی سطحی شد. نتیجه‌های آزمایشگاهی این روش بر روی نمونه‌های کوچک بسیار ارزشمند بوده و در بیشتر موردها از جداشدگی سطحی

ورق به طور کامل پیشگیری کرده و یا آن را تا حد زیادی به تأخیر انداخته است. اگر چه این روش هنوز نیاز به پژوهش‌های بیشتری دارد؛ ولی این روش به عنوان یک روش ابتکاری برای پدیدنیامدن جداشدگی سطحی ورق FRP از سطح بتن مطرح شده است. نتیجه‌های دیگر این پژوهش نشان می‌دهند که آماده‌سازی سطحی بتن مقاومت گسیختگی نهایی را نسبت به نمونه‌های بدون آماده‌سازی سطحی ۵ الی ۱۵ درصد افزایش می‌دهد [17]. افزون براین مشخص شد که شیار زدن طولی به علت افزایش سطح تماس اپوکسی با سطح بتن زیرین در راستای تنش طولی، باعث افزایش خوبی در مقاومت گسیختگی نهایی می‌شود. این افزایش به گونه‌ای است که شیار زدن طولی با عمق ۱۰ میلی متر مقاومت گسیختگی نهایی را تا حدود ۲۵ درصد نسبت به نمونه‌های با آماده‌سازی سطحی افزایش داد. این کار باعث شد تا کرنش در ورقه‌های FRP به کرنش نهایی برسد و ورق ماده مرکب گسیخته شود. این پدیده، استوار می‌سازد که شیارهای طولی با عمق کافی می‌تواند به پیشگیری کامل از پدیده‌ی جداشدگی (Debonding) بیانجامد [19و۱۸]. هدف از این مقاله ادامه این پژوهش‌ها برای بررسی میزان اثرگذاری عامل‌های شیار مانند عمق و عرض شیار بر کارآیی روش شیار زنی است تا با کمک آنها بتوان جداشدگی ورق FRP را در اختیار گرفت.

پژوهش‌های آزمایشگاهی

دستگاه آزمایش. در این پژوهش، آزمایش مورد بررسی آزمایش کشش ناشی از بارگذاری خمشی است. از این رو، دستگاه آزمایش طاقت بنا به استاندارد ASTM C1018 به کار برده شد (شکل (۱)).



شکل ۱ آزمایش خمش چهار نقطه‌ای بر روی نمونه‌ی منشوری

چگونگی ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی و طرح اختلاط بتن. نمونه‌های موردنظر شامل ۳۳ نمونه‌ی بتنی منشوری غیرمسلح به ابعاد ۵۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر می‌باشند. با هر بار کاربرد دستگاه مخلوط‌کن، ٦ نمونه‌ی منشوری ساخته شد. طرح اختلاط این نمونه‌ها برای رسیدن به مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی ٤٠ MPa می‌باشد که در جدول (۱) آمده است. ورق‌های ماده مرکب FRP از گونه CFRP با ضریب کشسانی ۲۳۱ GPa و کرنش نهایی ۱/۷ درصد می‌باشند که برای تقویت خمشی نمونه‌های موجود به ابعاد ۰/۱۲×٤٠×٣٦٠ میلی‌متر تهیه شده‌اند.

جدول ۱ طرح اختلاط نمونه‌های منشوری

مقاومت فشاری (MPa)	$(\frac{W}{C})$	سیمان (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	شن (kg/m^3)
٤٠	٠/٤٧	٤٨٥	٢٢٨	٨٦٧	٧٣٦

دسته‌بندی نمونه‌های آزمایشگاهی. دسته‌بندی کلی نمونه‌ها برای بررسی این موردها می‌باشد:

۱. بررسی اثر افزایش عمق شیار بر بار گسیختگی نهایی ورق.

۲. بررسی اثر افزایش عرض شیار بر بار گسیختگی نهایی ورق.

در راستای بررسی این دو عامل، ۳ عمق مختلف شامل۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ میلی متر و ۳ عرض مختلف با اندازه‌های ٤، ٦ و ۸ میلی‌متر در نظرگرفته می‌شود. یادآور می‌شود که در همه نمونه‌ها، شمار شیار ها ۲ عدد است و طول شیارها در همه نمونه‌ها برابر طول ورق در نظر گرفته شده است. همچنین فاصله آزاد (بیرون تا بیرون) شیارها ثابت و برابر ۱۰ میلی‌متر فرض شده است.

روش انجام آزمایش. در روش شیار زنی ابتدا محل ایجاد شیارها بر روی نمونه‌ها مشخص و سپس با کاربرد دستگاه برش مخصوص، شیارها بر روی نمونه زده شد. سطح داخل شیارها در نمونه‌های آماده شده با دستگاه فشار باد کاملا تمیز شد تا از هرگونه آلودگی و گرد و غبار پاک شود. در این مرحله داخل شیارها با اپوکسی Epoxy Dur 31 N به گونه‌ای پر شد که سطح نمونه صاف و یکنواخت باشد (شکل (۲)). پس از پر شدن کامل شیارها با این چسب، اپوکسی دیگری به نام Epoxy Dur 300 برای چسباندن ورق FRP به سطح نمونه به کار رفت. پس از برداشتن چسب اضافی با کمک کاردک از روی ورق ها و خشک شدن چسب پس از سه روز، نمونه زیر بارگذاری خمشی ٤ نقطه‌ای قرار گرفت. لازم به یادآوری است که برای هر عرض و عمق مشخص دست کم ۲ نمونه یا بیشتر آزموده شده است که همه نتیجه‌های کامل آن در ادامه ارائه می‌شود.





شکل ۲ مرحله‌های روش شیار زنی (ایجاد شیار- پر نمودن شیارها با اپوکسی مناسب)

نتیجه‌های آزمایشگاهی

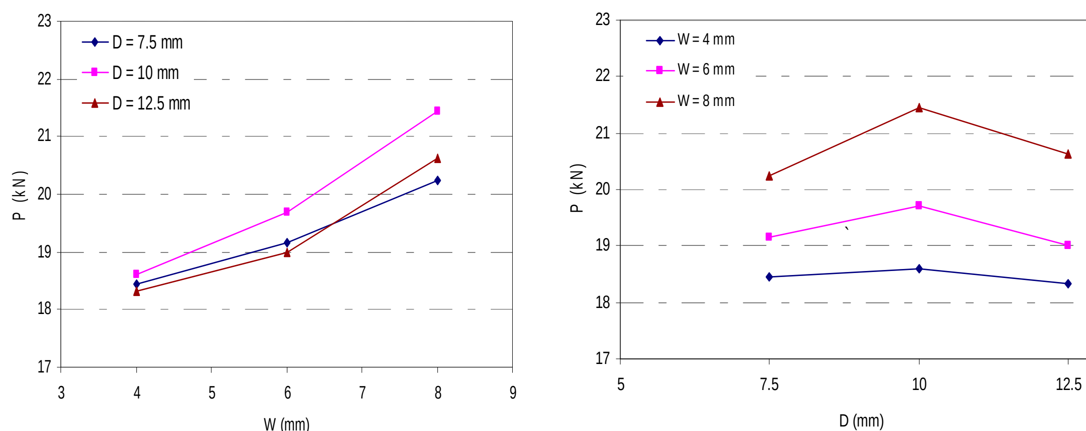
نمونه‌های مورد بررسی که شامل ۳۳ نمونه منشوری بودند، زیر بارگذاری خمشی ٤ نقطه‌ای تا لحظه‌ی گسیختگی نهایی قرار گرفتند. در جدول (۲) نتیجه‌های بار گسیختگی نهایی همه نمونه‌ها را همراه با چگونگی گسیختگی آن‌ها می‌توان مشاهده کرد. شایان یادآوری است که در این جدول‌ها نماد D ، بیانگر جداشدگی زود رس ورق (Debonding) می‌باشد و نماد F، نشان‌دهنده‌ی پارگی کامل ورق، نماد D-F، بیانگر پارگی بخشی از ورق و جداشدگی بخش دیگر است.

جدول ۲ نتیجه‌های آزمایشگاهی از اندازه‌های مختلف شیار

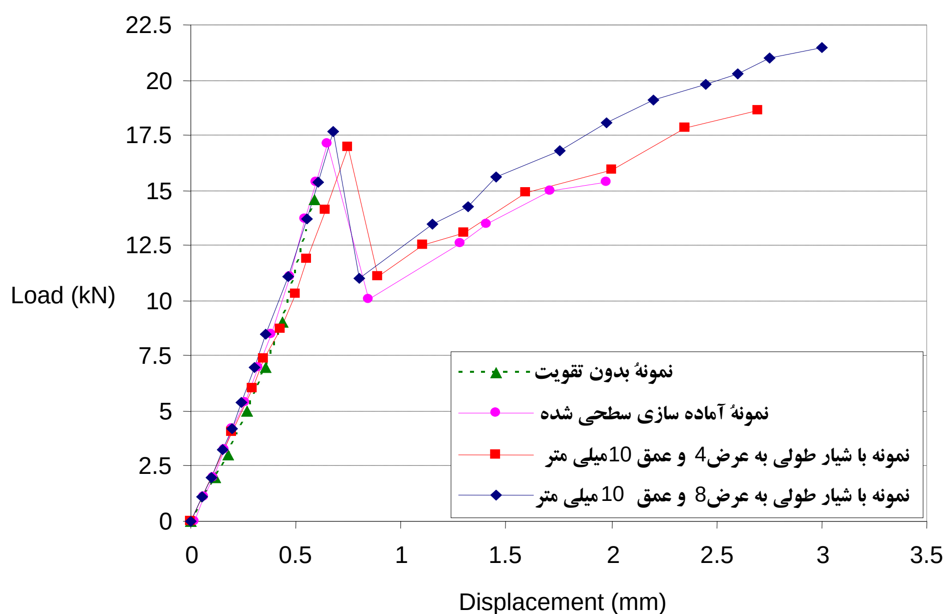
ردیف	شماره نمونه	میانگین مقاومت فشاری زمان انجام آزمایش (MPa)	عمق شیار (mm)	عرض شیار (mm)	بار گسیختگی نهایی (kN)	چگونگی گسیختگی
۱	۱	٤٤/۹۲	۷/۵	٤	۱۸/۲	D-F
	۲	٤٤/۹۲	۷/۵	٤	۱۸/۷	D-F
	۳	٤٦/۱۱	۷/۵	٤	۱۸/٤	D
۲	۱	٤٤/٤۳	۱۰	٤	۱۷/۹	D
	۲	٤٤/۹۲	۱۰	٤	۱۸/۵	D-F
	۳	٤٤/۹۲	۱۰	٤	۱۹/٤	D-F
۳	۱	٤۵/٤۹	۱۲/۵	٤	۱۷/۵	D-F
	۲	٤۵/٤۹	۱۲/۵	٤	۱۷/۵	D
	۳	٤٦/۱۱	۱۲/۵	٤	۱۹/۸	D
	٤	٤٤/٤۳	۱۲/۵	٤	۱۸/۵	D-F
٤	۱	٤۵/۱٤	۷/۵	٦	۱۸/۹	D-F
	۲	٤۵/۱٤	۷/۵	٦	۱۹/٤	D-F
	۳	٤۵/٤۹	۷/۵	٦	۱۹/۲	D
۵	۱	٤۵/۱٤	۱۰	٦	۲۰	F
	۲	٤۵/۱٤	۱۰	٦	۱۹/۳	F
	۳	٤۵/٤۹	۱۰	٦	۱۹/۸	F
٦	۱	٤۵/۱٤	۱۲/۵	٦	۱۸/۵	D-F
	۲	٤۵/۱٤	۱۲/۵	٦	۱۹/۳	F
	۳	٤۵/٤۹	۱۲/۵	٦	۱۹/۲	D-F
۷	۱	٤۵/۸٦	۷/۵	۸	۲۰/۵	D-F
	۲	٤۵/۸٦	۷/۵	۸	۲۰/۰۵	F
	۳	٤۵/۸٦	۷/۵	۸	۲۰/۳	F
	٤	٤۵/۸٦	۷/۵	۸	۲۰/۱۵	F
۸	۱	٤٦/۱۱	۱۰	۸	۲۱/۱	F
	۲	٤٦/۱۱	۱۰	۸	۲۱/۳	F
	۳	٤٤/٤۳	۱۰	۸	۲۱/٦	F
	٤	٤٤/٤۳	۱۰	۸	۲۱/۸	F
۹	۱	٤٦/۱۱	۱۲/۵	۸	۲۱/۳	F
	۲	٤٦/۱۱	۱۲/۵	۸	۲۰/٦	F
	۳	٤٤/٤۳	۱۲/۵	۸	۲۰/۵	F
	٤	٤٤/٤۳	۱۲/۵	۸	۲۰/۱	F
۱۰	۱	٤٤/۹۲	نمونه‌ی بتنی بدون تقویت		۱٤/٦	–
۱۱	۱	٤٤/۹۲	نمونه‌ی تقویت‌شده به روش آماده سازی سطحی		۱۷/۱	D

میانگین بار گسیختگی نهایی هر دسته از نمونه‌ها، بر روی شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل‌ها D، بیانگر عمق شیار و W، نشان دهنده عرض شیار است. همچنین در این شکل‌ها P، بار گسیختگی نهایی ورق را نشان می دهد.

با هدف این که امکان مقایسه بین روش شیار زنی با روش آماده سازی سطحی بهتر فراهم شود، نمودارهای بار– تغییر مکان در برخی از نمونه‌ها در شکل (٤) آورده شده است.



شکل ۳ نمودارهای اثر عمق و عرض شیار



شکل ٤ مقایسه‌ی نمودارهای بار– تغییر مکان

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر برای بررسی اثر افزایش عرض و عمق شیار بر بار گسیختگی نهایی تیرهای بتنی تقویت شده با ورق FRP، شمار ۳۳ نمونه‌ی بتنی منشوری به ابعاد ۵۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر ساخته شدند. با هدف بررسی اثر عمق و عرض شیار بر بار گسیختگی نهایی ورق، سه عرض مختلف ٤، ٦ و ۸ میلی‌متر و سه عمق مختلف ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ میلی‌متر به صورت ترکیبی بر روی نمونه‌ها ایجاد شد و سپس نمونه‌ها با آزمایش خمش ٤ نقطه‌ای آزموده شدند. با بررسی نمودارهای به دست آمده می توان این نتیجه‌ها را گرفت:

۱. آماده‌سازی سطحی بتن باعث افزایش ۱۷ درصدی بار گسیختگی نهایی نسبت به نمونه‌ی بدون تقویت خمشی می‌شود. با اجرای روش شیار زنی، بار گسیختگی نهایی دست کم ۷ و دست بالا ۲۵ درصد نسبت به روش آماده‌سازی سطحی افزایش پیدا می‌کند. کارآیی روش شیار زنی در این نمونه‌ها نسبت به آماده‌سازی سطحی بهتر می‌باشد؛ مقایسه‌ی رفتار نمودارهای بار- تغییر مکان نیز درستی این مطلب را استوار می‌سازد.

۲. در همه عرض‌ها با افزایش عمق شیار از ۷/۵ به ۱۰ میلی‌متر، بار گسیختگی نهایی ورق هم افزایش پیدا می‌کند، ولی با افزایش عمق به ۱۲/۵ میلی‌متر، بار گسیختگی کاهش می‌یابد. این نکته بدان معنی است که عمق ۱۰ میلی متر برای همه‌ی عرض‌ها به عنوان عمق بهینه حساب می‌شود که بیشترین بار گسیختگی در این عمق به دست می‌آید.

۳. در همه‌ی عرض‌ها، بار گسیختگی نهایی ورق در عمق ۱۲/۵ میلی‌متر از بار متناظر آن در عمق ۱۰ میلی‌متر هم کمتر است. این مطلب نشان می‌دهد که افزایش عمق به بیش از ۱۰ میلی‌متر باعث ایجاد ضعف در عملکرد روش شیار زنی می‌شود.

٤. در عرض ٤ میلی‌متر، افزایش عمق اثر چندانی بر افزایش بار گسیختگی نمی‌گذارد و نمودار به صورت تقریبی خطی است؛ ولی با افزایش عرض شیار میزان اثر افزایش عمق هم بیشتر می‌شود و در عرض ۸ میلی‌متر اثر افزایش عمق بر بالا بردن بار گسیختگی نهایی ورق بسیار روشن است.

۵. در هر عمق ثابت، افزایش عرض شیار به افزایش بار گسیختگی نهایی ورق می‌انجامد و میزان این افزایش در عمق ثابت ۱۰ میلی‌متر بیشتر از عمق‌های دیگر می‌باشد.

٦. با توجه به چگونگی گسیختگی‌ها می توان دریافت که در عرض ٤ میلی متر امکان پارگی کامل ورق وجود ندارد و نخستین پارگی کامل ورق در عرض ٦ میلی‌متر و عمق ۱۰ میلی‌متر رخ داده است. در عرض ۸ میلی‌متر و در همه عمق‌ها پارگی کامل روی می‌دهد و دیگر اثری از جداشدگی ورق وجود ندارد. نتیجه‌های این آزمایش‌ها نشان داد که در روش شیار زنی با کاربرد عمق و عرض مشخص شیارها، امکان پیشگیری کامل از جداشدگی ورق از سطح بتن وجود دارد. در شکل (۵) گونه‌های گسیختگی مشاهده شده در آزمایش‌ها به نمایش درآمده است.



(الف) (ب) (ج)

شکل ۵ گونه‌های گسیختگی (الف) جداشدگی کامل (ب) جداشدگی بخشی از ورق (ج) پارگی کامل ورق

۷. با توجه به نتیجه‌های آزمایش، این مطلب را می‌توان دریافت که افزایش عرض شیار اثر بیشتری نسبت به افزایش عمق شیار در بالا بردن بارگسیختگی نهایی ورق دارد.

مراجع

1. Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T. and lam, L., "FRP Strengthened RC structures", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 6(3), pp. 232-245, (2002).
2. Oehlers, D. J., "Development of design rules for retrofitting by adhesive bonding or bolting either FRP or steel plate to RC beams or slabs in bridges and building", *Composites*, *Part A*, 32, pp. 1345-1355, (2001).
3. Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T. and Lam, L., *"FRP-Strengthened RC Structures"*, JOHN WILEY & SONS, LTD, England, (2002).
4. Karbhari, V. M. and Zhao, L., "Issues related to composite plating and environmental exposure effects on composite-concrete interface in external strengthening", *Composite Structures*, 40(3), pp. 293-304, (1997).
5. Hutchinson, A. R., *"Strengthening of Reinforced Concrete Structure"*, London, ch. 3, pp. 70-74, (1993).
6. Chajes, M. J., Finch, W. W., Januszka, T. F. and Thomson, T. A., "Bond and force transfer of composite material plates bonded to concrete", *ACI Structural Journal*, 93(2), pp. 208-217, (1996).
7. Spadea, G., Bencardino, F. and Swamy, R. N., "Structural behavior of composite RC beams with externally bonded CFRP", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2(3), pp. 132-137, (1998).
8. Kamada, T., and Victor C. Li., "The effects of surface preparation on the fracture behaviour of ECC/concrete repair system", *Journal of Cement & Concrete Composites*, 22, pp. 423-431, (2000).
9. Galecki, G., Maerz, N., Nanni, A. and Myers, J., "Limitation to use of waterjets in concrete substrate preparation", *American Waterjet Conference*, (2001).
10. Toutanji, H. , and Ortiz, G., "The effect of surface preparation on the bond interface between FRP sheets and concrete members", *Journal of Composite Structures*, 53, pp. 457-462, (2001).
11. Bencardino, F., Spadea, G., and Swamy, N., "Strength and ductility of reinforced concrete beams externally reinforced with carbon fiber fabric", *ACI Structural Journal*, 99(2), pp. 163-171, (2002).
12. Buyukozturk, O., Gunes, O., and Karaca, E., "Characterization and modeling for debonding in RC beams strengthened with FRP composites", 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, New York, pp. 1-8, (2002).
13. Pimanmas, A., and Pornpongsaroj, P., "Peeling behaviour of reinforced concrete beams strengthened with CFRP plates under various end restraint conditions", *Magazine of Concrete Research*, 56(2), pp. 73-81, (2004).

14. Rosenboom, O., and Rizkalla, S., "Experimental study of intermediate crack debonding in fiber-reinforced polymer strengthed beams", *ACI Structural Journal*, 105(1), pp. 41-50, (2008).
15. Mostofinejad, D., and Mahmoudabadi, E., "Effect of elimination of concrete surface preparation on the debonding of FRP laminates", *Concrete Solutions Confrence*, Italy, pp. 357-361, (2009).
16. Mostofinejad, D., and Mahmudabadi, E., "An alternative method to surface preparation to postpone debonding of FRP laminates", *9th International Symposium of Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*, Sydney, Australia, (2009).
17. Mostofinejad, D., and Mahmudabadi, E., "Grooving as an alternative method of surface preparation to postpone debonding of FRP laminates in concrete beams", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, (2010).

۱۸. محمود آبادی، احسان، "شیار طولی به عنوان شیوه‌ی جایگزین آماده‌سازی سطحی در نصب کامپوزیت‌های CFRP جهت تقویت خمشی تیرهای بتنی"، پذیرش شده جهت چاپ در مجله‌ی شریف، دانشگاه صنعتی شریف، (۱۳۸۸).

۱۹. محمود آبادی، احسان، "شیار زنی به عنوان یک روش جایگزین آماده سازی سطحی بتن جهت جلوگیری از جداشدگی سطحی ورق FRP"، پایان نامه کارشناسی ارشد عمران – گرایش سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، (۱۳۸۸).